

# SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS SOBRE UM RECIFE ARTIFICIAL

## Modelação numérica com o modelo COULWAVE

**Ana MENDONÇA**

*Engª do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101; 1700 LISBOA, amendonca@lnec.pt*

**Conceição Juana FORTES**

*Engª Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101; 1700 LISBOA, jfortes@lnec.pt*

**Rui CAPITÃO**

*Engª Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101; 1700 LISBOA, rcapitao@lnec.pt*

**Maria da Graça NEVES**

*Engª Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101; 1700 LISBOA, gneves@lnec.pt*

**José Simão ANTUNES DO CARMO**

*Engª Civil, IMAR/UC, FCTUC, Departamento de Engenharia Civil, 3000 Coimbra, Portugal, jsacarmo@dec.uc.pt*

### Resumo

A construção de um emissário submarino na zona marítima adjacente à praia de Leirosa, Portugal, afectou profundamente a continuidade do sistema dunar existente, pelo que foi inicialmente adoptada uma solução provisória que consistiu na protecção frontal das dunas, numa primeira fase com contentores de material geotêxtil preenchidos com areia (geocontentores) e, numa segunda fase, com tubos igualmente de material geotêxtil (geotubos). Pretende-se agora estudar a viabilidade da construção de um recife artificial que funcione como obra de protecção do sistema dunar e que, adicionalmente, melhore as condições locais para a prática de *surf*.

O artigo descreve a aplicação do modelo não-linear de tipo Boussinesq COULWAVE na simulação da propagação de ondas sobre um recife artificial a ser implantado na referida região da praia de Leirosa. Mais concretamente, o objectivo do trabalho é analisar o funcionamento hidrodinâmico do recife para diferentes condições de agitação marítima incidente.

Assim, com base em dados de agitação medidos nas proximidades da zona em estudo, é definido um conjunto de estados de agitação mais frequentes e são efectuadas simulações numéricas para as situações sem e com o recife artificial implementado. É testada uma solução de geometria triangular para o recife. A comparação dos resultados do modelo numérico para ambas as situações (sem e com recife), em termos de alturas de onda, linha de rebentação e ângulo de rebentação, permite avaliar a influência desta solução de recife nas condições hidrodinâmicas de agitação marítima em torno do recife e permite também avaliar as condições locais para a prática de *surf*.

**Palavras-Chave:** *Recifes artificiais, Surf, Modelação numérica, COULWAVE, Rebentação*

## 1 - INTRODUÇÃO

A costa atlântica Portuguesa encontra-se actualmente bastante fragilizada e a necessitar de urgentes medidas reparadoras que, simultaneamente, satisfaçam os requisitos essenciais de protecção da costa, salvaguardem as fontes de atracção turística e promovam o desenvolvimento sustentável. Considera-se que, nas últimas décadas, terão sido fundamentalmente os grandes volumes de areias extraídos dos sistemas fluviais e das zonas portuárias que conduziram ao défice sedimentar generalizado que hoje se manifesta ao longo de grande parte da costa Portuguesa. Terão igualmente contribuído para este balanço negativo muitas das obras de regularização fluvial, de que se destacam as grandes barragens construídas essencialmente a partir de meados do século passado, bem como a implementação de estruturas portuárias e de outras obras com finalidades de protecção local.

Particularmente vulnerável é a situação vivida na Leirosa, onde a duna frontal que se desenvolve desde o esporão da Leirosa até próximo da foz da ribeira do Extremal está quase totalmente destruída, evidenciando importantes recuos da linha de costa e pondo em risco (LOPES *et al.*, 2003):

- a) o aglomerado da Leirosa, situação que, não sendo ainda crítica, importa acautelar;
- b) o emissário dos efluentes urbanos do aglomerado da Leirosa, o qual se desenvolve paralelamente à costa, para Sul, e que se liga ao emissário das fábricas de celulosas;
- c) a câmara de carga do emissário submarino das fábricas de celulosas localizada a cerca de 1km a Sul da Leirosa.

Um trecho da duna em frente à câmara de carga do emissário foi parcialmente reforçado em 2005, utilizando mantas de geotêxteis, envolvendo adequados volumes de areia (contentores), numa extensão de cerca de 120m. Este reforço foi decidido na sequência de tempestades ocorridas em Fevereiro de 2001, que afectaram particularmente esta zona e conduziram a uma gradual e perigosa fragilização do sistema dunar nos anos seguintes.



Figura 1. Vista aérea, com a Leirosa ao fundo, da câmara de carga do emissário e do trecho da duna em frente à câmara de carga (a vermelho) que foi parcialmente reabilitada, TEN VOORDE *et al.* (2006).

Embora se equacione a resolução da grande vulnerabilidade desta zona através da construção de um esporão a Sul do emissário das celulosas, tal estrutura pesada de contenção não está prevista no Plano de Ordenamento da Orla Costeira. A resolução do problema poderá passar, como se julga actualmente, pela construção de um recife artificial, com funções de protecção costeira e de geração de ondas, consideradas úteis para a prática de *surf*, o que permitirá dotar esta zona de condições ímpares em Portugal para uso balnear e desportivo. Nesta perspectiva, sugerem-se construções de obras submersas multi-funcionais, em material geotêxtil, com potencialidades de protecção costeira,

enriquecimento ambiental e usos balneares muito atractivos, proporcionando uma elevada mais-valia sócio-económica à região.

Com base em simulações numéricas, apresenta-se, nas secções seguintes, um estudo da resposta de um recife com a geometria triangular, com as características definidas em TEN VOORDE *et al.* (2008), para diferentes condições de agitação marítima. Pretende-se implantar este recife a Sul da Leirosa, em frente ao trecho particularmente vulnerável mostrado na Figura 1. A funcionalidade do recife será analisada com base nos valores dos parâmetros de *surfabilidade*, que se relacionam com um dos objectivos do recife – criar condições favoráveis à prática de *surf*. A análise da funcionalidade do recife no que se refere à protecção costeira não será abordada no presente artigo.

Assim, primeiramente definiram-se as condições de agitação marítima incidente mais frequentes com base quer nas medições efectuadas na bóia-ondógrafo da Leirosa, de Outubro de 2008 a Maio de 2009, quer na transposição do regime de agitação marítima obtido na Figueira da Foz, de Julho de 1984 a Fevereiro de 1996, para o ponto de localização da referida bóia. Seguidamente, para algumas destas condições e para a situação sem e com recife, efectuaram-se simulações numéricas com o modelo não linear de tipo Boussinesq COULWAVE (LYNETT e LIU, 2002). Obtiveram-se, assim, na zona em estudo, entre outros, os valores da altura de onda significativa e a posição da linha de rebentação. Com os resultados do modelo numérico, determinaram-se dois dos parâmetros de *surfabilidade* (ângulo de rebentação e tipo de rebentação) que caracterizam o funcionamento do recife na prática do *surf*.

A seguir a esta introdução, no ponto 2 descreve-se a metodologia desenvolvida para análise do funcionamento de um recife artificial. No ponto 3 descreve-se sumariamente a zona em estudo e a caracterização da agitação marítima local. No ponto 4 apresenta-se a aplicação da metodologia ao recife artificial a implementar na praia da Leirosa e discutem-se os resultados das simulações efectuadas. Apresentam-se e discutem-se também os parâmetros de *surfabilidade*. No ponto 5 apresentam-se as principais conclusões do estudo efectuado.

## 2 - ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DA SOLUÇÃO DO RECIFE

### 2.1 - Introdução

Uma das principais funções de um recife artificial para o *surf* é melhorar as condições para a prática do *surf* da zona. De uma forma genérica, pretende-se que esta estrutura induza ou melhore o tipo de rebentação, favoreça o aumento da altura de onda, provocando a rebentação num dado local, e garanta que esta persista de forma gradual ao longo da crista da onda, numa distância suficientemente longa.

No caso de recifes artificiais para a prática do *surf*, os parâmetros mais utilizados para análise do seu funcionamento são:

- A altura da onda ao longo da linha de rebentação;
- O ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação;
- O comprimento da linha de rebentação;
- O tipo de rebentação, determinado através do número de Iribarren ao longo da linha de rebentação;
- As características da “parede da onda”;
- A amplificação da altura da onda em relação à altura de onda incidente.

Estes parâmetros são designados como parâmetros de *surfabilidade*. Estes são, logicamente, dependentes uns dos outros e o seu valor pretendido varia com o nível de aptidão dos *surfistas* (experiência ou habilidade dos *surfistas*) para os quais se pretende dimensionar o recife. Embora as diferentes classificações para o nível dos praticantes de *surf* sejam subjectivas,

existem várias classificações propostas, como, por exemplo, a de WALKER (1974), descrita na Tabela 1, e a de HUTT *et al.* (2001), ambas em função do ângulo de rebentação,  $\alpha$ .

Tabela 1. Relação entre o ângulo de rebentação,  $\alpha$ , e o nível de dificuldade na execução de manobras (WALKER, 1974).

Nível	Descrição	$\alpha$ (°)
1	Iniciados	90
2	Iniciados capazes de <i>surf</i> lateralmente ao longo da crista de rebentação	70
3	<i>Surfistas</i> que conseguem aumentar a velocidade na face da onda	60
4	<i>Surfista</i> a aprender mas manobras standard do <i>surf</i>	55
5	<i>Surfistas</i> capazes de realizar manobras <i>standard</i> do <i>surf</i> numa única onda	50
6	<i>Surfistas</i> que executam manobras <i>standard</i> de <i>surf</i> consecutivamente	40
7	<i>Surfistas</i> que executam manobras avançadas	29
8	<i>Surfistas</i> profissionais	27

O ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação é definido como o ângulo entre a crista da onda e a linha de rebentação,  $\alpha$ :

$$\sin \alpha = \frac{c}{V_s} \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação da onda e  $V_s$  é a velocidade do *surfista*.

Seguindo a metodologia de WALKER (1974), o ângulo de rebentação está associado ao nível de dificuldade na execução de manobras na onda, Tabela 1.

O tipo de rebentação, determinado através do número de Iribarren ao longo da linha de rebentação,  $\xi_b$ , é definido por:

$$\xi_b = \frac{s}{\sqrt{H_b / L_0}} \quad (2)$$

onde  $s$  é o declive na zona do recife,  $H_b$  a altura de rebentação da onda e  $L_0$  o comprimento de onda ao largo. Na Tabela 2, apresenta-se a classificação do tipo de rebentação em função do número de Iribarren, segundo proposta de BATTJES (1974).

Tabela 2. Metodologia de Battjes: relação entre o número de Iribarren e o tipo de rebentação (BATTJES, 1974).

Tipo de rebentação	Número de Iribarren
Progressiva	$\xi_b < 0.4$
Mergulhante	$0.4 < \xi_b < 2.0$
De fundo	$\xi_b > 2.0$

## 2.2 - Metodologia de análise de funcionamento de um recife

Para a análise dos efeitos da presença de um recife artificial para o *surf* na melhoria das condições para a prática de *surf* numa dada zona, foi definida uma metodologia que permite comparar diferentes geometrias e localizações de um recife artificial, NEVES *et al.* (2007). Esta metodologia passa pela:

- Definição da(s) geometria(s) do recife artificial e da(s) sua(s) localização(ões);
- Aplicação de um modelo numérico de propagação de ondas à zona de estudo para o conjunto de condições de agitação, geometria(s) e localização(ões) de um recife pré-seleccionado pelo utilizador;
- Obtenção, com o modelo numérico, para cada condição de agitação, geometria e localização do recife, dos valores de altura de onda e direcção em todos os pontos do domínio de estudo;
- Obtenção dos parâmetros de *surfabilidade*, definidos em 2.1, correspondentes a cada condição de agitação, geometria e localização do recife, com base nos resultados do modelo numérico;
- Análise comparativa dos diferentes parâmetros de *surfabilidade*, para as diferentes condições de agitação, geometria e localização do recife.

Nas próximas sub-secções apresentam-se os principais aspectos relacionados com a definição da geometria do recife e com o modelo numérico utilizado.

### 2.2.1 - Geometria do recife artificial para *surf*

O estudo da geometria do recife multifuncional, isto é, da geometria da estrutura que se pretende que cumpra a função de, simultaneamente, proteger a costa e melhorar as condições de *surf* nas proximidades da sua zona de implantação, foi desenvolvido por TEN VOORDE *et al.* (2008).

O ângulo de rebentação é considerado como o parâmetro determinante, sendo função das características da onda de projecto: quanto maior for o valor da altura de onda, menor será o valor do ângulo de rebentação, já que a onda rebenta antes e, conseqüentemente, refracta menos.

Outro aspecto determinante no dimensionamento do recife é a escolha do nível de utilizadores: amadores, profissionais, etc.. Neste estudo, pretende-se que as condições de *surf* sejam adaptadas a *surfistas* amadores, pelo que o tipo de rebentação deve ser mergulhante (ou progressiva) e os valores do ângulo de rebentação,  $\alpha$ , devem ser superiores a 40°.

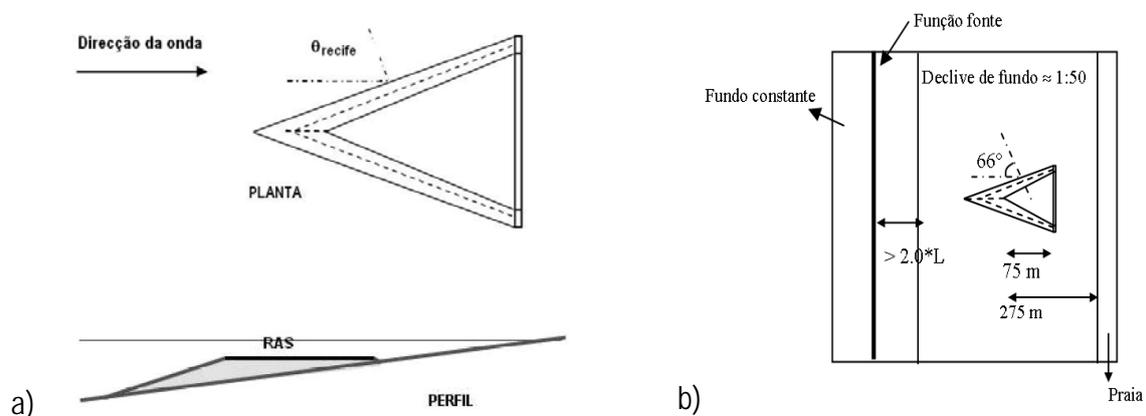


Figura 2. a) Geometria de base do recife artificial utilizada no estudo; b) Geometria de base usada nas simulações numéricas.

As características geométricas do recife a definir, no que se refere ao seu perfil, são a profundidade da cota de coroamento da estrutura e o declive de barlar do talude, Figura 2a. O declive do tardo do recife deve ser o menor possível, de forma a minimizar o volume total de material que compõe o recife. As dimensões definidas, no que se refere à configuração do recife em planta, correspondem ao ângulo do recife,  $\alpha_{\text{reef}}$ , e às dimensões e forma do mesmo, como apresentado na Figura 2a e Figura 2b.

O ângulo do recife tem grande influência nas correntes que se geram a sotamar do recife, que por sua vez influenciam a circulação de sedimentos, com impacto na protecção costeira. No estudo de TEN VOORDE (2008), é o ângulo de  $66^\circ$  que corresponde a melhores resultados de ângulo de rebentação (*peel angle*) e de altura de onda na zona de rebentação, pelo que foi este o valor utilizado neste estudo.

A cota de coroamento do recife é determinada por dois aspectos principais: deve ser suficientemente elevada para que a onda de projecto rebente sobre o recife e deve ser suficientemente profunda para não pôr em risco a segurança dos *surfistas*. Considerou-se neste estudo uma cota de coroamento mínima de 0.5 m para as condições de baixa-mar.

O estudo de TEN VOORDE *et al.* (2008) estabelece como valores mais adequados um declive do talude do recife de 1:10, uma altura do recife de 3.20 m e uma submergência mínima de 0.5 m. Estes são os parâmetros utilizados neste estudo.

Um parâmetro que não está directamente relacionado com a geometria do recife, mas que é também determinante no que se refere à protecção costeira, é a distância do recife à linha de costa, Figura 2b. A distância do tardo à linha de costa é testada para duas condições sendo sugerida em RANASINGHE e TURNER (2006) e TEN VOORDE *et al.* (2008) uma distância 50% superior à largura da zona de rebentação (*surf zone*).

### 2.2.2 - Modelo numérico COULWAVE

O código COULWAVE, LYNETT e LIU (2002), é uma implementação do modelo de propagação de ondas baseado nas equações de Boussinesq expandidas, deduzidas por WEI *et al.* (1995). As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e quantidade de movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*). Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades. Com estes perfis de velocidade, que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzido um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas intermédias e apresentar características lineares até um número de onda de  $kh \sim 8$ , e um comportamento não linear de 2ª ordem até  $kh \sim 6$ .

LYNETT e LIU (2002) introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade, dependentes do tempo, para ter em conta variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

O modelo é assim aplicável desde águas intermédias até à rebentação. Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser correctamente simuladas pelo modelo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por WEI e KIRBY (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. A formulação de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais, são utilizadas diferenças finitas centradas com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são calculadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente

preciso até  $\Delta t^4$  em tempo e  $\Delta x^4$  em espaço. A diferença relativamente a WEI e KIRBY (1995) refere-se à natureza de alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores são aplicados dois tipos de condições: de reflexão total e de radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de WEI e KIRBY (1995), enquanto que para a condição de radiação ou condição de fronteira aberta é usado um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), de acordo com KIRBY *et al.* (1998).

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em LYNETT e LIU (2002) e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre, velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador e zonas de rebentação.

### 3 - ZONA DE ESTUDO

#### 3.1 - Caracterização geral

A zona em estudo localiza-se na costa junto a Leirosa, cerca de 10 km a sul (S) da foz do rio Mondego, onde se encontra a unidade fabril de pasta de papel Celulose Beira Industrial (CELBI) S.A..

A zona inclui uma orla arenosa que se estende por cerca de 2 km com desenvolvimento arqueado, de curvatura crescente para norte (N), e orientação geral NNE-SSW. Este troço costeiro é limitado, a Norte, por uma plataforma rochosa com cerca de 4.5 km de extensão, que termina na praia do Moledo, e a Sul, pelo promontório rochoso do Forte do Cão que se desenvolve por cerca de 1 km até à praia de Afife.

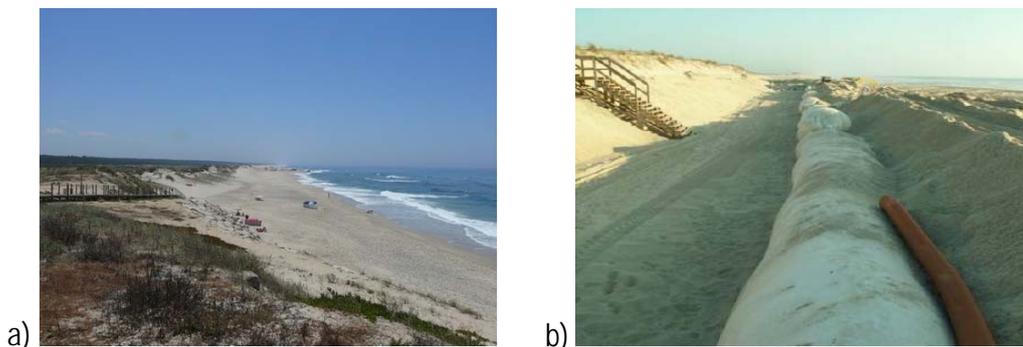


Figura 3. a) Praia da Leirosa; b) Barreira de protecção da duna.

O sistema dunar da Leirosa (a sul da Figueira da Foz) foi fortemente debilitado em consequência da implantação de um emissário submarino para rejeição das águas residuais, a cerca de três quilómetros da costa, provenientes das empresas CELBI e SOPORCEL e, mais recentemente, da Leirosa. Atendendo à necessidade de uma intervenção urgente, adoptou-se uma metodologia que consistiu no reforço da duna com geotêxteis, através da construção de uma barreira de protecção, a qual foi em seguida coberta por uma camada de areia com cerca de 1.0 m e sobre a qual se procedeu a uma replantação adequada, ANTUNES DO CARMO *et al.* (2010). Esta metodologia apresenta a vantagem de não alterar visualmente a zona intervencionada, podendo ser adaptada à morfologia de cada local específico e utilizando a areia existente no próprio local.

### 3.2 - Caracterização da agitação marítima

Para prever as alterações que podem ocorrer na costa de Leirosa com a construção de um recife nesta zona, é necessário o conhecimento, tão fiel quanto possível, do regime de agitação marítima nas suas imediações, assim como das correspondentes séries temporais de parâmetros de agitação marítima de interesse.

Para a zona em estudo, foram recentemente obtidos dados de agitação marítima (HS, TZ e DIR) por uma bóia-ondógrafo localizada no ponto P5, Figura 5, na batimétrica dos 25 m (ZH), posição 40° 03' 22" N; 8° 57' 22" W, no período compreendido entre Outubro de 2008 a Maio de 2009, (IH, 2009). Estes dados consistem em valores tri-horários dos parâmetros de altura significativa, HS, período de zero ascendente, TZ, e direcção de onda, DIR, e referem-se a 1293 registos. Na Figura 4 apresentam-se as relações HS-TZ, HS-DIR e DIR-TZ obtidas com base nos referidos dados no ponto P5.

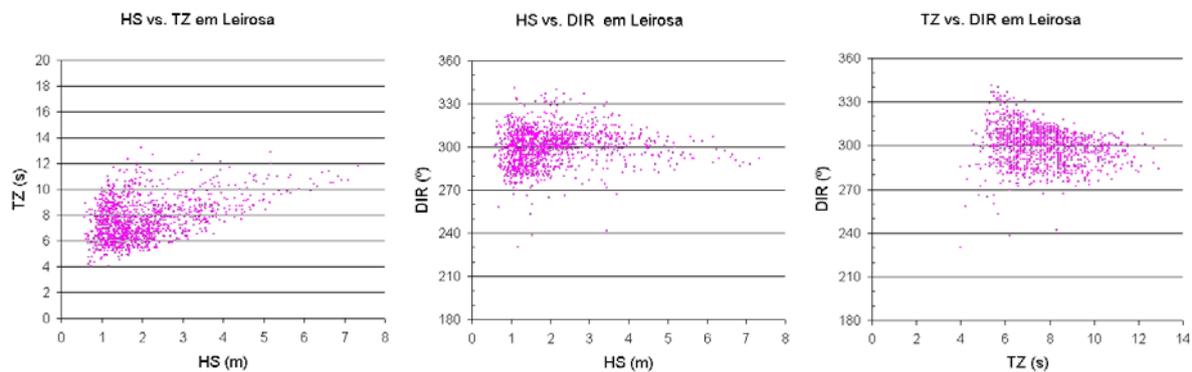


Figura 4. Regime de agitação local. Relações HS-TZ, HS-DIR e DIR-TZ no ponto P5 da Figura 5.

Da Figura 4 verifica-se que:

- As direcções mais frequentes são as dos sectores de 270° a 330°. Na gama de direcções entre 295° e 310°, verificou-se o maior número de ocorrências. As direcções mais frequentes (300° e 310°) estão associadas sobretudo a alturas de onda abaixo de 3.0 m e a períodos entre 5 s e 10 s;
- Os valores de HS mais frequentes estão abaixo de 3.0 m;
- Os valores de TZ variam entre 4 s e 13 s, sendo a gama de períodos mais frequente entre 5 s e 10 s.

Dado o curto período de tempo de observação dos dados de agitação marítima, julgou-se interessante efectuar uma comparação com o regime de agitação marítimo calculado para esse local com base num maior período de tempo, mesmo que não sejam os dados efectivamente medidos na zona em estudo. Recorreu-se assim aos dados observados na Figueira da Foz, com um total de 13 237 registos obtidos durante o período de Julho de 1984 a Fevereiro de 1996, CAPITÃO *et al.* (1998). O objectivo principal é avaliar, qualitativamente, se os dados da bóia de Leirosa se inserem no regime obtido a partir do da Figueira da Foz.

Assim, para obter o regime de agitação no local com base no regime da Figueira da Foz, utilizou-se a metodologia TRANSFER, COLI *et al.* (1999), Figura 5. Esta metodologia consiste em transferir os dados da Figueira da Foz para o largo e, assim, definir o regime geral observado ao largo da Figueira da Foz. Este regime ao largo foi considerado como o regime ao largo da presente zona em estudo, isto é, o regime geral observado ao largo da praia de Leirosa. Seguidamente, o regime ao largo foi transferido para a zona em estudo, mais concretamente para o ponto P5 (em frente da zona da praia),

através da aplicação da mesma metodologia TRANSFER, Figura 5. Definiu-se assim o regime de agitação marítima local na zona marítima da praia de Leirosa.

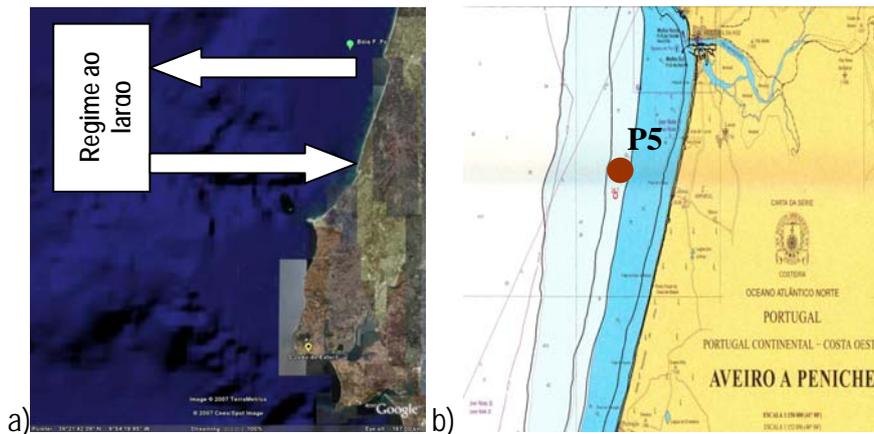


Figura 5. a) Metodologia TRANSFER (Coli *et al.* 1999). b) Localização do ponto P5, representativo da zona marítima de estudo e da posição da bóia-ondógrafo.

Na Figura 6 sob a sigla “F.Foz transpostos”, é apresentado o regime de agitação marítima local, em frequência relativa dos parâmetros HS, TP e DIR na zona marítima da praia de Leirosa, transposto da Figueira da Foz. Iguamente, na mesma figura, são apresentados, sob a sigla “Bóia Leirosa”, os correspondentes valores de frequência relativa do regime observado numa bóia-ondógrafo localizada no ponto P5, na batimétrica dos 25 m (ZH), posição 40º 03' 22" N; 8º 57' 22" W, referente a dados medidos de agitação marítima no período compreendido entre Outubro de 2008 a Maio de 2009.

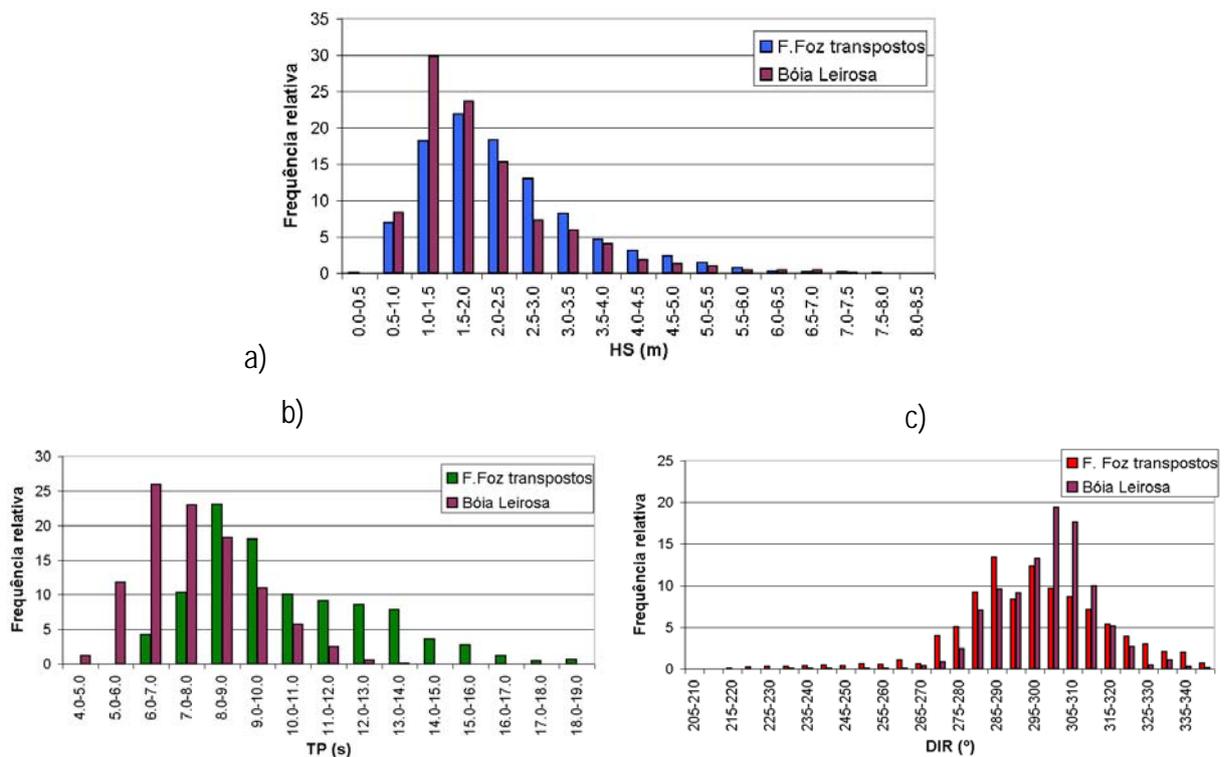


Figura 6. Histogramas marginais de a) HS (altura significativa), b) TP (período de pico) e c) Direcção.

Da Figura 6 verifica-se que:

- Em termos de alturas de onda, o andamento dos valores medidos (Bóia Leirosa) e transpostos (F.Foz transpostos) é similar, assim como a gama de valores encontrados, embora para os valores medidos o maior número de ocorrência seja observado na classe [1-1.5] m, enquanto que para os transpostos seja a classe [1.5 -2.0] m a que produz mais ocorrências.
- Em termos de período de onda, as diferenças acentuam-se entre os valores medidos e os transpostos. Os dados medidos apresentam uma gama muito maior de períodos entre 4 s e 13 s, ao passo que os calculados estão entre 6 e 19 s. Verifica-se também que, em média, os períodos transpostos são superiores aos períodos medidos na bóia.
- Em termos de direcção de onda, há também diferenças entre os valores medidos e transpostos. Na bóia local, as direcções mais frequentes são as dos sectores de 295° a 310° enquanto que nos transpostos são as dos sectores de 285° a 300°. Na bóia, verificou-se o maior número de ocorrências na gama de direcções entre 295° e 310°, enquanto que nos transpostos, a gama onde se verificaram mais ocorrências foi a de 285° a 300°.

Apesar das notórias diferenças nos períodos de onda dos referidos conjuntos, desta comparação considera-se que, pelo facto de tanto as alturas de onda provenientes de ambos os conjuntos de dados serem muito idênticas como as direcções associadas, o conjunto de dados adicional referente à transposição é válido nesta situação e introduz mais-valia no conjunto de dados medidos no local.

## 4 - ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO RECIFE ARTIFICIAL

### 4.1 - Introdução

Em traços gerais, a aplicação da metodologia de análise do funcionamento de um recife no que se refere às condições para a prática de *surf* geradas na zona da costa de Leirosa passa pela:

- Definição da solução (geometria e perfil) do recife artificial e da sua localização com base no estudo de TEN VOORDE (2008);
- Aplicação do modelo COULWAVE para determinação das características de agitação (altura e direcção da onda) ao redor do recife, para diferentes condições de agitação;
- Obtenção dos parâmetros de *surfabilidade*, definidos em 2.1, correspondentes a cada condição de agitação, geometria e localização do recife, com base nos resultados do modelo numérico.

Nas secções seguintes apresentam-se as condições de aplicação do modelo COULWAVE, os resultados obtidos e o cálculo dos parâmetros de *surfabilidade*.

### 4.2 - Condições de aplicação do modelo COULWAVE

#### 4.2.1 - Batimetria

A batimetria da zona em estudo foi obtida com base nas seguintes cartas:

- Carta do Instituto Hidrográfico 'Carta nº24202. Aveiro a Peniche'. Escala 1:150 000. 1ª Edição, Outubro de 2000;
- Carta C135-C0005, referente aos levantamentos topo-hidrográficos do emissário CELBI/SOPORCEL. Escala 1:2000, Junho de 2002;
- Carta do Instituto Hidrográfico 'Cabo Mondego ao Cabo Carvoeiro'. Escala 1:150 000, 6ª Edição, Maio de 1970.

O conjunto de pontos obtidos e respectivas isolinhas de batimetria são representados na Figura 7b. A geometria do recife foi definida por TEN VOORDE *et al.* (2008) e implementada na zona de interesse (

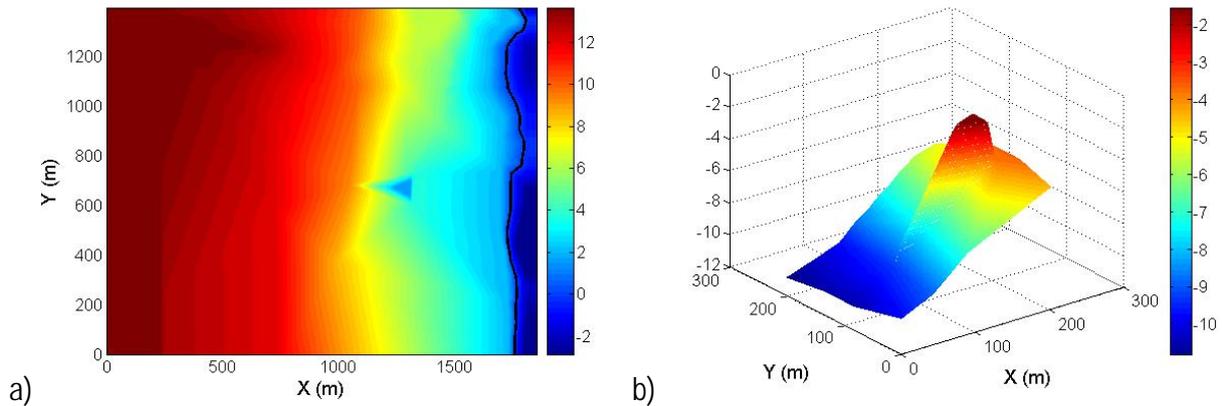


Figura 8) recorrendo ao software Surface Modelling System, Zundel (2009).

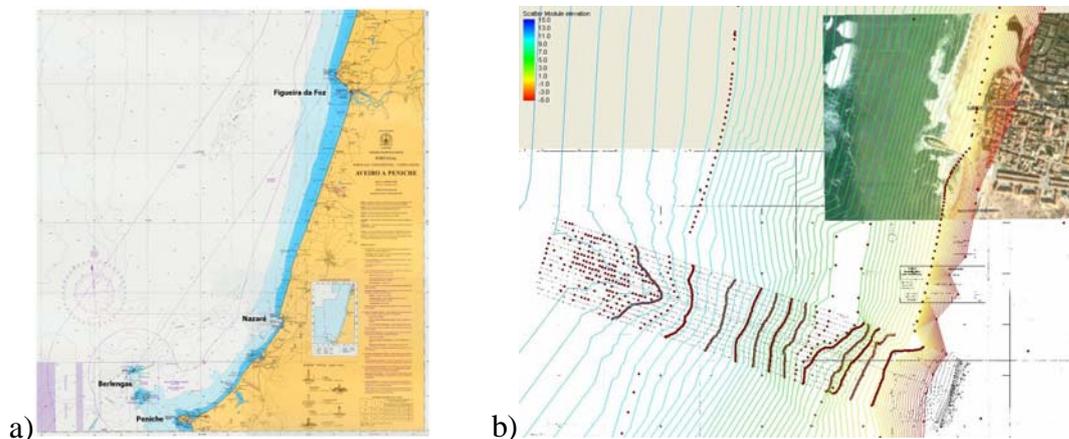


Figura 7. a) Localização da área em estudo (carta hidrográfica do Cabo Mondego ao Cabo Carvoeiro, do Instituto Hidrográfico, escala 1: 150 000, 1915); b) Dados batimétricos.

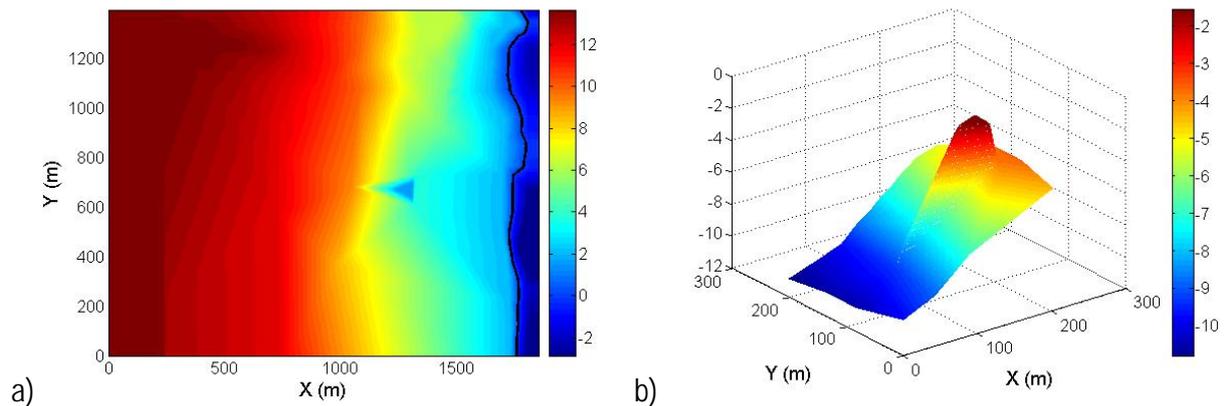
#### 4.2.2 - Condições de agitação

As condições de agitação foram definidas com base nas condições de agitação frequentes obtidas na bóia da Leirosa e apresentadas em 3.2.

Testaram-se dois níveis de maré, de +1.0 m (Z.H.) e +2.0 m (Z.H.), correspondentes, respectivamente, a baixa-mar e nível médio. Para cada nível, foram efectuadas simulações com ondas regulares. As características das ondas regulares corresponderam a direcções de agitação incidente de 285°, períodos de onda de 6.0 s e 8.0 s e alturas de onda de 1 m e 2 m, Tabela 3.

#### 4.2.3 - Domínio computacional

As simulações foram realizadas para a situação sem recife e com recife de modo a analisar a influência do recife na zona. A zona de estudo foi discretizada por uma malha regular de espaçamento constante  $\Delta x = \Delta y \approx 2.0$  m, com 1776 m na direcção  $x$  e 1400 m na direcção  $y$ ,



**Figura 8.** O tempo de cálculo correspondeu à simulação de 75 ondas nos casos 'C1', 'C3' e 'C4' e de 100 ondas no caso 'C5', ver Tabela 3. Os tempos de simulação variaram entre cerca de 19 e 25 horas (Dual Core AMD Opteron, Processador 265, 4 processadores), memória 8 Gb, SPECfp\_rate2000 = 54.7), dependendo do período da onda, número de ondas simuladas e pontos por comprimento de onda considerados.

No código COULWAVE é gerada uma malha computacional regular com base num número mínimo de pontos por comprimento de onda, fornecido pelo utilizador e definido consoante o período, ver Tabela 3 de forma a ser obtida uma malha com um espaçamento constante.

Foi também adicionado ao domínio uma zona de profundidade constante na qual se efectua a geração da onda através do método da função-fonte, WEI *et al.* (1995). Foram usadas nas extremidades laterais (barlamar e sotamar) do domínio de cálculo, condições fronteira de absorção (camadas de  $L/2 = gT^2/4\pi$ , sendo L é o comprimento de onda e T o período) com o objectivo de absorver a energia das ondas que atingem estas regiões. Nas restantes fronteiras consideraram-se condições de reflexão total.

O número de *Courant* admitido foi igual a 0.5 e o passo temporal é cerca de 0.09 s. A função-fonte foi colocada na posição  $x = 80$  m e foram impostas as condições de agitação de ondas regulares sinusoidais indicadas na Tabela 3. Os resultados numéricos foram obtidos para todos os nós da malha de cálculo em termos de elevação da superfície livre, componentes da velocidade horizontal em  $x$  e  $y$  e zonas de rebentação.

Tabela 3. Parâmetros característicos das malhas computacionais utilizados na simulação com o modelo COULWAVE, para os casos C1 a C5, nível médio (NM) e baixa mar (BM).

	Dir.x (m)	Dir.y (m)	$\Delta x = \Delta y$ (m)	H (m)	T (s)	N. de ondas simuladas	Pontos da malha por comprimento de onda	Passo temporal (s)
C1 -Sem recife, NM	1855	1397	2.262	2.0	8.0	75	35	0.0980
C2, NM	1855	1397	2.262	1.0	8.0	75	35	0.0981
C3, NM	1855	1397	2.262	2.0	8.0	75	35	0.0981
C4, BM	1852	1397	2.205	2.0	8.0	100	35	0.0992
C5, NM	1827	1397	2.086	2.0	6.0	100	25	0.0904

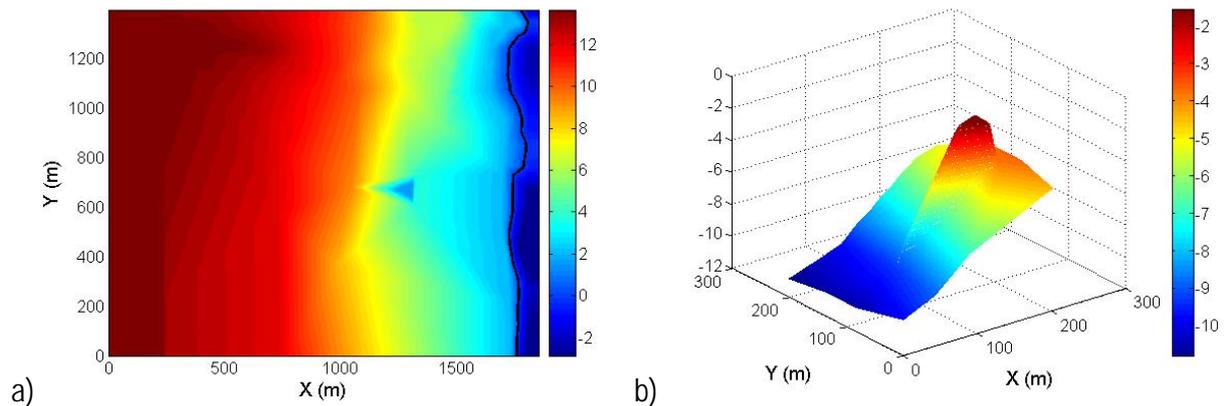


Figura 8. a) Domínio de cálculo e batimetria do caso C2. A linha a preto representa a linha de costa; b) Detalhe da geometria do recife artificial no domínio de cálculo.

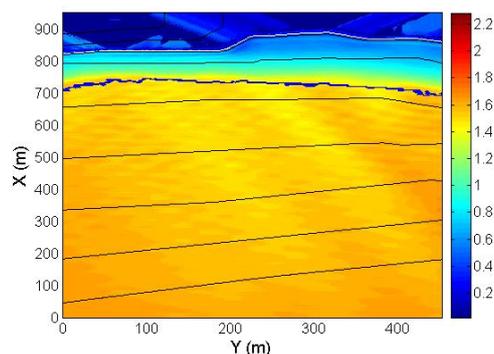
#### 4.2.4 - Parâmetros de rebentação

Os parâmetros empíricos relacionados com o atrito de fundo, o espraiamento e a rebentação foram ajustados com base no estudo de MENDONÇA *et al.* (2009). Nesse trabalho, é realizada uma análise paramétrica para um caso de estudo que envolveu modelação física e consequente comparação destes resultados com os resultados do código COULWAVE.

### 4.3 - Tratamento e análise dos resultados

#### 4.3.1 - Alturas de onda e linha de rebentação

Para as condições de agitação marítima definidas na secção 3.2 e para as situações sem e com recife, efectuaram-se cálculos com o modelo COULWAVE. Obtiveram-se, para cada condição de agitação, os valores das alturas de onda bem como da posição da linha de rebentação (linha contínua a azul), Figura 9.



a) C1: sem recife, NM,  $T=8.0$  s,  $H=2.0$  m

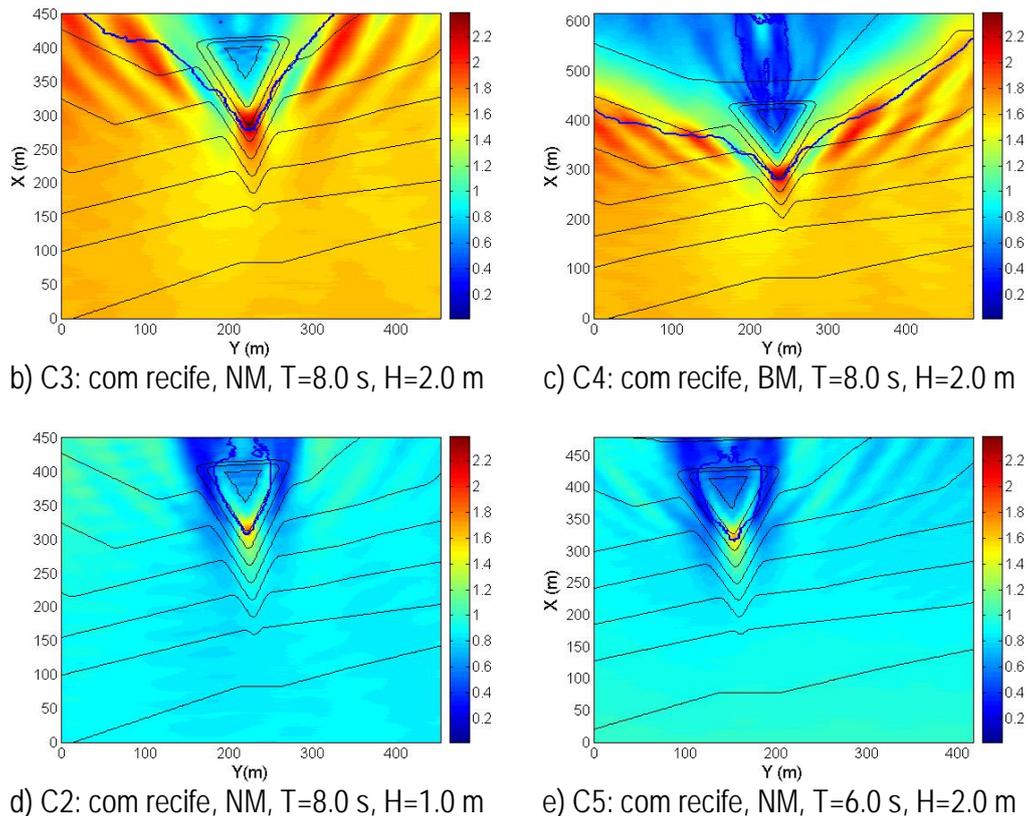


Figura 9. Representação das alturas de onda e da linha de rebentação na zona do recife artificial.

Na situação sem recife (C1) a rebentação da onda ocorre junto à linha de costa (Figura 9), com alturas de cerca de 1.6 m-1.8 m para a situação de NM, com uma onda incidente de  $H=2.0$  m e um período de  $T=8.0$  s. Para a situação com recife, nas mesmas condições de agitação (C3), verifica-se que a onda se aproxima do recife com uma altura de cerca de  $H=2.2$  m, ocorrendo aí a rebentação da onda e conseqüente dissipação de energia, verificando-se o efeito do recife em termos de protecção costeira.

Observa-se que para a situação de BM, caso C4, em comparação com a situação de NM, caso C3, a rebentação inicia-se primeiro, sendo também mais longa a linha de rebentação (linha mais aberta), como seria de esperar. No caso C2, uma altura de onda  $H=1$  m, reduz significativamente a linha de rebentação para a zona de coroamento do recife. O mesmo acontece para o caso C5, em que a diminuição do período de onda para  $T=6$  s, reduz significativamente a zona de rebentação bem como a posição de rebentação que acontece posteriormente em comparação com o caso C3, com um período maior.

#### 4.3.2 - Cálculo dos parâmetros de *surfabilidade*

Com base nos valores da altura de onda no domínio de cálculo, determinou-se:

- Número de Iribarren ao longo da linha de rebentação, considerando um declive do recife de 1:10, segundo a equação 2;
- O tipo de rebentação com base no número de Iribarren.

Na Figura 10 apresentam-se os valores do número de Iribarren ao longo da linha de rebentação obtidos com o código COULWAVE para as situações C1 a C5. Quanto ao tipo de rebentação, observando o número de Iribarren, prevê-se uma rebentação do tipo mergulhante ( $0.4 < \xi_b < 2.0$ ) para

todas as situações simuladas com recife. Verifica-se ainda uma diminuição dos valores do número de Iribarren com a altura da onda incidente e com o período.

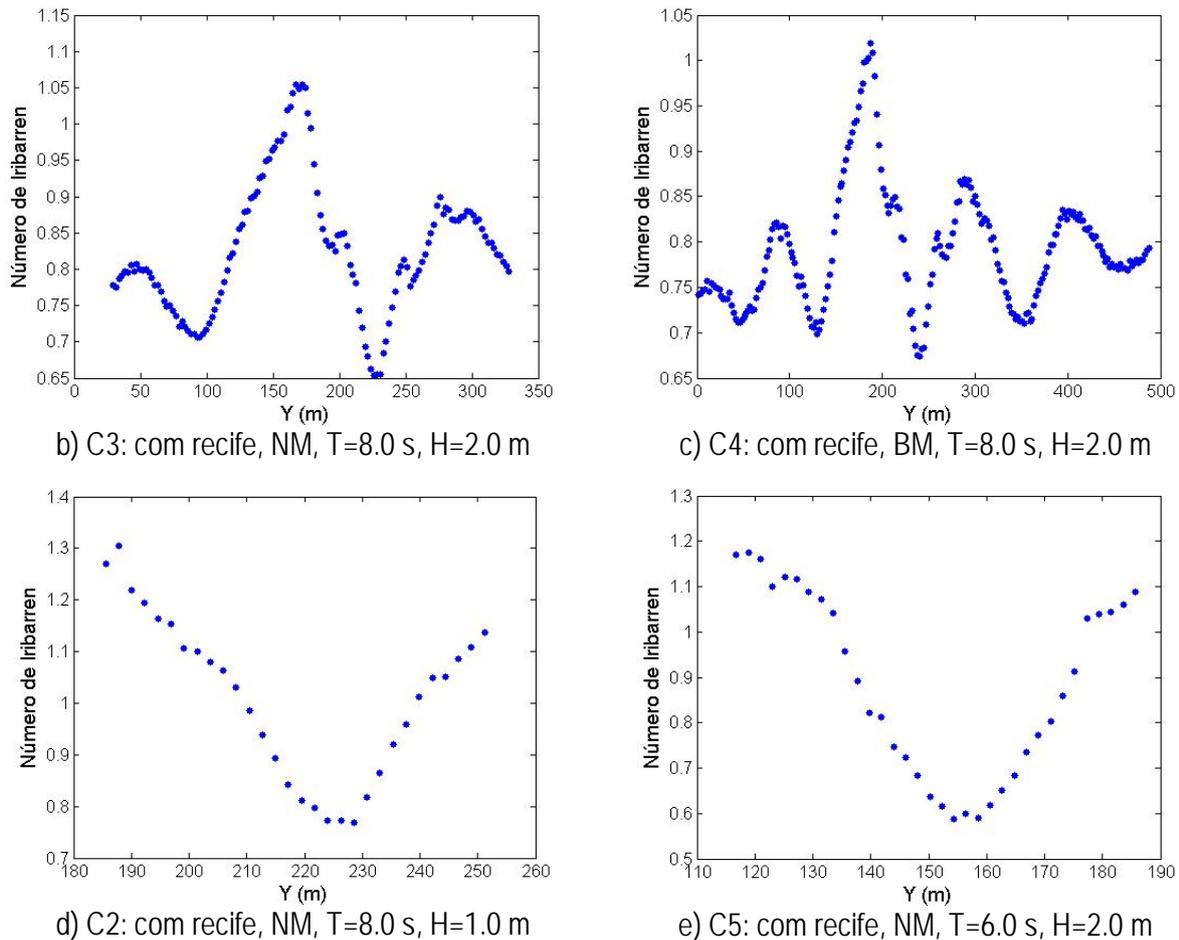


Figura 10. Representação do número de Iribarren ao longo da linha de rebentação.

A determinação do ângulo de rebentação para a caracterização do nível de dificuldade dos *surfistas* na execução de manobras implica o conhecimento do ângulo de propagação da onda e do ângulo da linha de rebentação.

Neste trabalho, o cálculo do ângulo de rebentação foi simplificado: o ângulo da linha de rebentação é analisado para os dois segmentos do recife, considerando-se aproximadamente constante em cada um, como se pode observar na Figura 9. O ângulo de rebentação obtido, para as situações com recife, varia entre  $50^\circ$  e  $60^\circ$ , o que representa uma velocidade adequada para *surfistas* amadores, de acordo com a Tabela 1.

## 5 - CONCLUSÕES

Neste artigo apresenta-se a aplicação de um código numérico baseado nas equações de Boussinesq expandidas (COULWAVE) ao estudo da hidrodinâmica em torno de um recife artificial para a prática do *surfe* para protecção costeira na zona de Leirosa, Portugal.

Este estudo iniciou-se com a determinação do regime de agitação marítima nas imediações do local de estudo. Para a zona em estudo, foram considerados os dados de agitação marítima (HS, TZ e DIR) obtidos por uma bóia-ondógrafo local, no período de Outubro de 2008 a Maio de 2009 (IH, 2009).

Porém, dado o curto período de tempo de observação dos dados de agitação marítima, julgou-se interessante considerar também os dados observados na Figueira da Foz, para o período de Julho de 1984 a Fevereiro de 1996, CAPITÃO *et al.* (1998). Apesar das notórias diferenças nos períodos de onda dos referidos conjuntos, considera-se que, pelo facto de tanto as alturas de onda provenientes de ambos os conjuntos de dados serem muito idênticas como as direcções associadas, o conjunto de dados adicional referente à transposição é válido nesta situação e introduz mais-valia no conjunto de dados medidos no local.

Para condições de agitação seleccionadas, foi aplicado o modelo numérico COULWAVE para as situações sem e com recife artificial. Com base nos resultados numéricos, determinaram-se dois parâmetros de *surfabilidade* (ângulo de rebentação e tipo de rebentação) que caracterizam o funcionamento do recife para a prática do *surf*. Verificou-se que os resultados do modelo para os casos testados, no que se refere aos parâmetros de *surfabilidade*, prevêm uma rebentação do tipo mergulhante e um valor do ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação entre 50° a 60°. Estes resultados indicam que o recife induz boas condições para a prática de *surf*.

A análise da protecção costeira proporcionada pelo recife não foi analisada no presente artigo. No entanto, dada a sua importância, a continuação deste trabalho prevê a análise das correntes dominantes no tardo do recife, a fim de obter uma primeira indicação das alterações induzidas pelo recife no transporte de sedimentos da zona.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projectos de investigação “Novos conceitos de protecção para a costa Portuguesa” (PTDC/ECM/66516/2006) e “Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de areias” (PTDC/ECM/67411/2006) financiados pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

## BIBLIOGRAFIA

- ANTUNES DO CARMO, J.S., SCHRECK REIS, C., FREITAS, H. – “Working with nature by protecting sand dunes: A case study”. *Journal of Coastal Research*, 2010 (em revisão).
- BATTJES, J.A. – “Surf similarity”. Proc. 14th International Conference on Coastal Engineering, 1974, pp. 466-479.
- CAPITÃO, R., FORTES, C.J., SANCHO, F., OLIVEIRA, F., VAZ, A. CARVALHO, M.M., COVAS, J.A. - “Doca de Pedrouços - Ribeira de Barcarena – Caracterização da Agitação Marítima”. Relatório 143/98-NPP. Lisboa, Junho 1998.
- COLI, A.B., SANTOS, J.A., FORTES, C.J., CAPITÃO, R., CARVALHO, M.M. - “Metodologia de propagação de regimes de agitação marítima do largo para a costa: análises dos modelos BACKTRACK-REFSPEC e SWAN”. *6º Congresso da Água, Porto*, Portugal, 1999.
- HUTT, J.A., BLACK, K.P. MEAD, S.T. - “Classification of surf Breaks in Relation to Surfing Skill”. *Journal of Coastal Research, special issue 29*, 2001, pp. 66 - 81.
- IH – Instituto Hidrográfico – “Tratamento de dados de agitação marítima: Leirosa”, 2009, Relatório Técnico.
- KIRBY, J.M., WEI, G., CHEN, Q., KENNEDY, A.B., DALRYMPLE, R.A. - Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model, Documentation and User's Manual, CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Dep. Civil Engng., Univ. Delaware, Newark, 1998.
- LYNETT, P., LIU, P. L.-F. – “Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth Integrated, Dispersive Wave Equations”. COULWAVE Code Manual Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package, 2002.

- MENDONÇA, A.C., PROENÇA, B., FORTES, C.J., NEVES, M.G. – “Estudo da hidrodinâmica em torno do recife artificial para a prática do *surf* a construir em São Pedro do Estoril, Cascais. Aplicação dos modelos de Boussinesq: COULWAVE e FUNWAVE”. Revista da Gestão Costeira Integrada (aceite para publicação), 2009.
- NEVES, M.G., FORTES C.J., MENDES, L.S, MONTEIRO, P.P. - “Viabilidade da implementação de um recife artificial para a prática de *surf* na praia de S. Pedro do Estoril e criação de uma estrutura de protecção e amarração do submarino Barracuda. Estudos de modelação numérica e física. Metodologias de trabalho”. Relatório182/07-NPE, 2007.
- RANASINGE, R. TURNER, I.L. – “Shoreline response to submerged structures: A review”. *Journal of Coastal Engineering* 53, 2006, pp. 65 - 79.
- TEN VOORDE, M., NEVES, M.G., ANTUNES DO CARMO, J.S. – “Estudo Preliminar da Geometria de um Recife Artificial para Protecção Costeira e para a Prática de *Surf* na Costa Oeste Portuguesa”. Revista da Gestão Costeira Integrada 8(1), 2008, pp. 65 - 79.
- WALKER, J.R. – “Recreational Surf Parameters”. *Tech. rept. 30*. University of Hawaii, James K.K. Look Laboratory of Oceanographic Engineering, 1974.
- WEI, G., KIRBY, J.T. – “A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations”. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 120, 1995, pp. 251 - 261.
- WEI, G., KIRBY, J. T., GRILLI, S. T., AND SUBRAMANYA, R. – “A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves”. *Journal of Fluid Mechanics* 294, 1995, pp. 71 - 92.
- ZUNDEL, A.K. - “Users Manual for the Surface Water Modeling System, Version 9.0, 2005.” Brigham Young University, Provo, Utah, U.S.A. 2005.